



TITLE:

A Study of Plasma-Induced Surface Roughness and Ripple Formation during Silicon Etching in Inductively Coupled Chlorine Plasmas(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Nakazaki, Nobuya

CITATION:

Nakazaki, Nobuya. A Study of Plasma-Induced Surface Roughness and Ripple Formation during Silicon Etching in Inductively Coupled Chlorine Plasmas. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19687>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	中崎 暢也
論文題目	A Study of Plasma-Induced Surface Roughness and Ripple Formation during Silicon Etching in Inductively Coupled Chlorine Plasmas (誘導結合塩素プラズマを用いたシリコンエッチングにおけるプラズマ誘起表面ラフネスとリップル形成に関する研究)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術であるプラズマエッチングのうち、塩素プラズマによるシリコンエッチングにおけるナノスケールの表面粗さ（ラフネス）と波状の表面周期構造（リップル）形成について、実験とプラズマ・固体表面相互作用の数値モデル解析に基づく形成機構解明に関する一連の研究成果をまとめたものであり、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、半導体集積回路デバイスとその製造プロセスにおけるプラズマエッチング技術の概要を述べるとともに、プラズマエッチングにおけるプラズマ・表面相互作用の特徴と、ラフネス形成にかかわる物理的・化学的機構について、現在の理解をまとめている。</p> <p>第2章では、本研究で用いる誘導結合プラズマエッチング装置とシリコン基板サンプル、プラズマ診断法（静電探針、発光分光、四重極質量分析、フーリエ変換赤外吸収分光）、ならびに表面診断法（段差計、原子間力顕微鏡、走査型電子顕微鏡）について、それらの動作原理や実験・解析手法をまとめている。</p> <p>第3章では、シリコンエッチング速度・表面ラフネスと基板表面へのイオン入射エネルギーとの関係を系統的に調べている。具体的には、誘導結合塩素プラズマの電子密度・温度・電位、中性反応種・反応生成物の密度・基板表面へのフラックス、およびイオンの密度・フラックス・エネルギーを種々のプラズマ診断法を用いて計測し、シリコンエッチング速度・表面ラフネスのイオンエネルギー依存性を解析した。その結果、ラフネス形成には、低イオンエネルギー領域におけるラフニングモードと高イオンエネルギー領域におけるスムージングモードの2つのモードがあること、前者においてラフネスはエッチング速度とともに増大し、またエッチング時間とともに増大すること、一方後者においてラフネスはエッチング速度や時間に相関せず低い値にとどまること、を初めて明らかにした。また、ラフニングからスムージングモードへの遷移に対応して、エッチング速度ひいてはエッチング収量のイオンエネルギー依存性も変化することより、イオンエネルギーに依存するラフネスの変化は表面反応過程の変化に依ることを示した。</p> <p>第4章では、上の塩素プラズマ中のイオンの種類とそれぞれの密度・フラックス、および不純物酸素の密度・フラックスをさらに詳しく計測し、シリコンエッチング速度・表面ラフネスとの関係を系統的に調べている。その結果、ラフニングモードでは反応ガス（塩素）イオンが、一方スムージングモードでは反応生成物（シリコン塩化物）イオンが支配的であることを示した。さらに、これらの実験と、古典的分子動力学法によるそれぞれのイオンとシリコン表面との相互作用、および三次元原子スケールセルモデルによるエッチング表面形状進展の数値解析との系統的な比較から、ラフ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	中崎 暢也
<p>ニングモードのラフネスの時間的増大と、スムージングモードのラフネスの低い値は、従来想定される塩素イオンと中性反応種による表面反応過程だけでは説明できず、前者は、シリコン表面の局所酸化によるマイクロマスク形成とマイクロラフネスパターン表面での塩素イオン反射の相乗効果に起因すること、また後者は、シリコン塩化物イオンの表面反射確率が塩素イオンと比較して小さいことに起因すること、を明らかにした。</p> <p>第5章では、上の第3章と第4章で得られた知見と解析をもとに、さらに、表面が荒れたシリコン基板を塩素プラズマでエッチングした場合の表面ラフネスのイオンエネルギー依存性を調べている。その結果、ラフニングモードではラフネスが一層増大するが、スムージングモードではラフネスが減少すること、すなわち、スムージングモードではラフネスの発達が生じないだけでなく初期に荒れた表面を平滑化できること、また、平滑化できる初期ラフネスの大きさにはしきい値があることを明らかにするとともに、しきい値以上の初期ラフネスの基板表面は、エッチングによりラフネスの表面に水平方向の拡がりが増大することを示した。</p> <p>第6章では、さらに、シース制御板を基板上に載置して、プラズマから基板表面へのイオン斜め入射を実現することにより、エッチングにおいて生じる表面ラフネスのイオン入射角度依存性を調べている。その結果、ラフニングモードではイオンの基板表面への入射角度に依存して表面ラフネス形状が変化し、入射角度が垂直から斜めに変化すると表面にリップル構造が発現すること、入射角度の増大とともに表面リップルの方向がイオン入射方向に直角方向から平行方向に遷移すること、を明らかにした。このようなイオン入射角度に依存して発現する表面リップル構造は、これまで、希ガスイオンビームとシリコン基板との相互作用において理論的・実験的に知られるとともに、プラズマにおいても同様な現象が生じることは三次元原子スケールセルモデルで予測されていたが、本研究で初めて実験実証された。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた結果を要約するとともに、プラズマエッチングにおけるプラズマ・表面相互作用に関する今後の研究課題に言及している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

プラズマエッチングは、半導体デバイスやマイクロマシン作製プロセスに不可欠の微細加工技術である。本論文は、塩素プラズマによるシリコンエッチングにおけるナノスケールの表面粗さ（ラフネス）と波状の表面周期構造（リップル）形成について、実験とプラズマ・固体表面相互作用の数値モデル解析に基づく形成機構解明に関する一連の研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 誘導結合塩素プラズマの電子密度・温度・電位、中性反応種・反応生成物の密度・基板表面へのフラックス、およびイオンの密度・フラックス・エネルギーを種々のプラズマ診断法を用いて計測し、シリコンエッチング速度・表面ラフネスとの関係を系統的に調べた。その結果、ラフネス形成にはラフニングとスムージングの2つのモードがあること、前者においてラフネスはエッチング速度とともに増大し、エッチング時間とともに増大すること、一方後者においてラフネスはエッチング速度や時間に相関せず低い値にとどまること、を初めて明らかにした。また、これらの実験と、三次元原子スケールセルモデルによるエッチング表面形状進展の数値解析との比較により、ラフニングモードのラフネスの時間的増大と、スムージングモードのラフネスの低い値は、従来想定されていたイオンと中性反応種の基板表面への入射では説明できないことを示した。

(2) 上の塩素プラズマ中のイオンの種類とそれぞれの密度・フラックス、および不純物酸素の密度・フラックスをさらに詳しく調べ、ラフニングモードでは反応ガス（塩素）イオンが、一方スムージングモードでは反応生成物（シリコン塩化物）イオンが支配的であることを示した。さらに、古典的分子動力学法によるそれぞれのイオンとシリコン表面との相互作用と、三次元原子スケールセルモデルによる表面形状の数値解析の系統的な比較から、スムージングモードでの低いラフネスの値は、シリコン塩化物イオンの表面反射確率が塩素イオンと比較して小さいことに起因すること、また、ラフニングモードでのラフネスの時間的増大は、シリコン表面の局所酸化によるマイクロマスク形成とマイクロラフネスパターン表面での塩素イオン反射の相乗効果に起因することを明らかにした。

(3) 得られた知見と解析をもとに、さらに、スムージングモードではラフネスの発達が生じないだけでなく初期に荒れた表面を平滑化できること、ラフニングモードではイオンの基板表面への入射角度に依存して表面ラフネス形状が変化し、入射角度が垂直から斜めに変化すると表面にリップル構造が発現すること、入射角度の増大とともに表面リップルの方向がイオン入射方向に直角方向から平行方向に遷移すること、を初めて実験実証した。

以上、要するに、本論文は、塩素プラズマによるシリコンエッチングにおけるナノスケールの表面ラフネス形成について、実験と数値モデル解析を駆使して、ラフネス形成条件と形成機構を明らかにするとともに、表面平滑化と表面リップル構造形成を実験実証したものであり、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。